

ным расчета полное выгорание газа происходит на расстоянии двух калибров от среза горелки, т. е. уже в нижней части ковша, исключая этим недожог топлива.

Таким образом, математическое моделирование позволяет выполнить анализ выгорания газообразного топлива и установить влияние пульсаций на режим выгорания. Результаты исследования могут быть использованы для выбора уровня углубления горелки в ковш и режима подачи газозооушной смеси.

УДК 669.045

**Ю. А. Гичев**

Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск, Украина

## **ОЦЕНКА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА КОНВЕРТОРНОГО ГАЗА В ПРОЦЕССЕ НАГРЕВА МЕТАЛЛОЛОМА**

### **Аннотация**

*Оценка энергетического потенциала конвертерного газа, выполненная по результатам вычисления ожидаемых от сжигания газа в процессе нагрева лома тепловых мощностей и на основе совместного решения уравнений тепловых балансов процесса нагрева и конвертерного процесса с учетом его избыточной теплоты, показала возможность нагрева конвертерным газом массы лома, составляющей значительную долю от массы металлошихты кислородно-конвертерной плавки. По результатам расчетов доля лома в металлошихте, которая без подогрева лома составляет максимум 25–30 %, может быть увеличена в результате нагрева лома конвертерным газом на 7,3÷18,5 % в зависимости от варианта нагрева и составить соответственно до 32,3–48,5 % от массы металлошихты.*

*Ключевые слова:* металлолом, нагрев, конвертерный газ, энергетический потенциал, тепловой баланс.

### **Abstract**

*Assessment of the energy potential of converter gas, which made according to the calculating resultsexpectedthermal capacities from the birning of gas in the heating process of scrapand on the basis of the joint solution of the equations of thermal balance of the heating process and converter process taking into account its excessive heat, showed the possibility heating mass of scrap with the converter gas, which constitute a significant proportion of the mass of metal stock oxygen converter smelting. On results of calculations the proportion of scrap in metal stock, which without heating of scrap constitutes a maximum of 25–30% , can be increased in result of heating the of scrap with converter gas at 7,3÷18,5% depending on the version of heating and constitutes, accordingly, to 32,3–48.5% from the weight of metal stock.*

*Keywords:* scrap metal, heating, converter gas, energy potential, the heat balance.

Нагретый конвертерным газом металлолом позволяет вернуть максимальное количество теплоты газа в конвертер с подогретой шихтой [1], так как доля лома в твердой шихте кислородно-конвертерной плавки наиболее весомая по сравнению с другими компонентами

(известью, известняком, железорудными материалами и проч.).

Предварительный нагрев металлолома является одним из способов повышения доли лома в металлошихте кислородно-конвертерной плавки и соответствующего снижения расхода чугуна на выплавку стали. Так как затраты, связанные со сбором и подготовкой металлолома, значительно меньше по сравнению с расходами на производство чугуна, увеличение доли лома в металлошихте приводит к непосредственному снижению себестоимости стали.

Использование для нагрева металлолома конвертерного газа вносит ряд дополнительных позитивных факторов к обычному подогреву лома от посторонних источников теплоты.

В частности, нагрев лома для конвертерной плавки синхронно с выходом газа из конвертера способствует согласованию ритмов обоих процессов. В этом случае каждая последующая плавка получает лом, нагретый отходящим газом предыдущей плавки, а использование для нагрева лома внутреннего источника теплоты конвертерных плавов в виде отходящего газа делает процесс нагрева независимым от постороннего топлива, что является немаловажным фактором, особенно в условиях дефицита топлива.

При использовании конвертерного газа в отличие от других способов нагрева лома энергоемкость конвертерной стали снижается не только за счет сокращения расхода чугуна, но и путем непосредственной экономии топлива, потребление которого при нагреве лома от постороннего источника может оказаться весьма значительным. Например, нагрев лома до температуры 800 °С, которая обеспечивает достаточное количество аккумулированной ломом теплоты при относительно минимальном угаре металлолома, что является наиболее предпочтительным для предварительного нагрева, и при тепловом КПД нагрева в пределах  $0,3 \div 0,5$ , что охватывает достаточно большое разнообразие видов нагревательных устройств и режимов нагрева, требует на 1 т лома  $0,045 \div 0,062$  т условного топлива, что при нагреве лома от постороннего источника значительно увеличивает топливопотребление кислородно-конвертерных цехов.

Нагрев лома конвертерным газом, т. е. без сжигания дополнительного топлива, исключает или значительно снижает отрицательное влияние процесса нагрева на экологические показатели кислородно-конвертерного производства.

В задачу данной работы входили:

- оценка энергетического потенциала конвертерного газа в процессе нагрева металлолома;
- вычисление температуры нагрева металлолома при использовании конвертерного газа.

Нагрев металлолома для конвертерной плавки независимо от способа его осуществления тесно взаимосвязан с технологией кислородно-конвертерного процесса, а именно, с его тепловым балансом, который, в зависимости от температуры нагрева лома и с учетом избыточной теплоты процесса, определяет массу подаваемого в конвертер металлолома.

Взаимосвязь между процессом нагрева металлолома и технологией кислородно-конвертерной плавки усиливается при использовании для нагрева лома конвертерного газа. В частности, сокращение расхода чугуна вследствие увеличения доли лома в металлошихте при подаче его в конвертер в нагретом состоянии, приводит к снижению выхода конвертерного газа. В результате, при использовании конвертерного газа для нагрева металлолома, с одной стороны, увеличивается доля лома в металлошихте, а с другой стороны, уменьшается

объем выходящего из конвертера газа, что необходимо учитывать при оценке энергетического потенциала газа в процессе нагрева металлолома.

Среди технологических показателей плавки, которые могут влиять на процесс нагрева лома конвертерным газом, следует также учитывать продолжительность продувки конвертера  $\tau_{пр}$ , величина которой определяет продолжительность выхода газа, а следовательно, и время нагрева лома. От продолжительности продувки при синхронном с выходом использовании конвертерного газа зависит также величина получаемой от сжигания газа тепловой мощности, которая должна соответствовать тепловой мощности, необходимой для нагрева лома.

Таким образом, оценка энергетического потенциала конвертерного газа в процессе нагрева металлолома, кроме энергетических характеристик газа (его температуры и теплоты сгорания), должна учитывать значения по крайней мере двух параметров, определяемых технологией кислородно-конвертерного процесса, а именно, количество выходящего газа и продолжительность продувки конвертера.

При оценке энергетического потенциала конвертерного газа необходимо также учитывать состав передельного чугуна, в первую очередь содержание в нем углерода, который непосредственно определяет количество выделяющегося газа и в значительной степени влияет на величину избыточной теплоты процесса. Для получения достаточно реальных результатов оценки следует учитывать также величину теплового КПД нагрева или степени использования теплоты газа.

Расчет количества выделяющегося газа (на 1 т выплавляемой стали)  $\nu_{кг}$  выполнен по методике, приведенной в работе [2] при продувке чугуна с содержанием углерода в пределах 3,0÷4,5 %.

Удельная тепловая мощность (на 1 т садки конвертера), которая может быть получена при сжигании выделяющегося из конвертера газа с учетом его физической теплоты определялась по формуле:

$$Q_M^{кг} = \nu_{кг} M_{ст} (\nu_{со} Q_{со} + c_{кг} t_{кг}) / \tau_{пр}, \quad (1)$$

где  $M_{ст}$  – выход стали на 1 т садки конвертера;  $\nu_{со}$  – содержание СО в конвертерном газе;  $Q_{со}$  – теплота сгорания СО;  $c_{кг}$ ,  $t_{кг}$  – теплоемкость и температура конвертерного газа.

Удельная тепловая мощность, необходимая для нагрева лома, определялась выражением:

$$Q_M^H = m_{л} M_{ст} c_{л} t_{л} / (\eta_{г} \eta_{н} \tau_{пр}), \quad (2)$$

где  $m_{л}$  – доля лома в металлошихте кислородно-конвертерной плавки;  $c_{л}$ ,  $t_{л}$  – теплоемкость и температура нагрева лома;  $\eta_{г}$ ,  $\eta_{н}$  – выход годного в конвертерной плавке и тепловой КПД нагрева.

В расчетах по формулам (1) и (2) содержание оксида углерода в конвертерном газе принято 90 %, температура газа – 1700 °С, продолжительность продувки конвертера – 12, 15 и 18 мин, температура нагрева лома – 600÷1000 °С, выход годного в конвертерной плавке – 0,9.

Результаты расчета представлены на рис. 1.

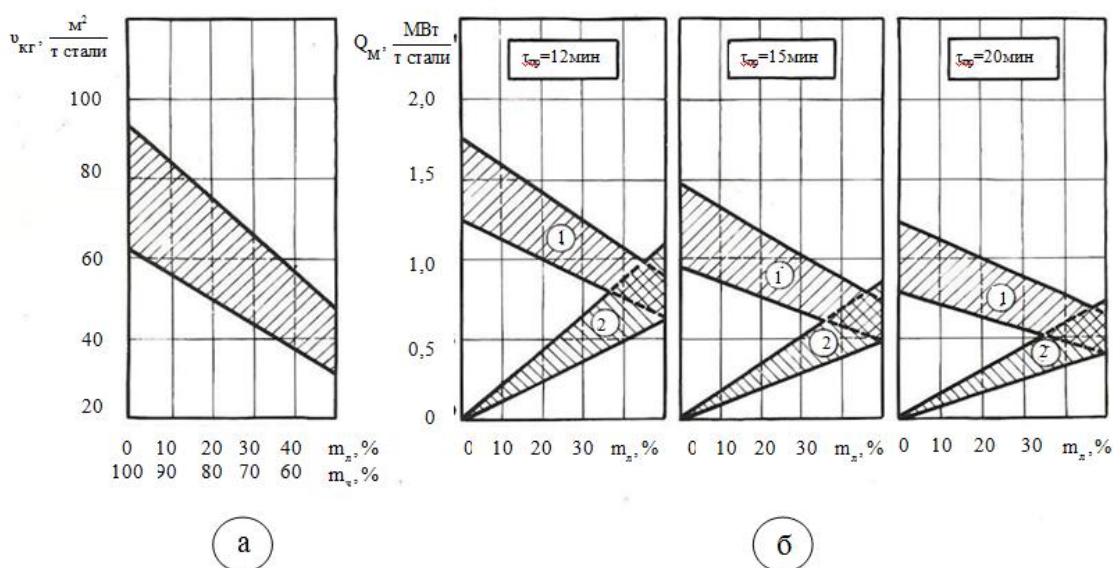


Рис. 1. К оценке энергетического потенциала конвертерного газа в процессе нагрева металлолома: а – зависимость удельного выхода конвертерного газа от соотношения массовых долей лома ( $m_{л}$ ) и чугуна ( $m_{ч}$ ) в металлошихте кислородно-конвертерной плавки (верхняя линия при содержании углерода в чугуне 4,5 %, нижняя – 3,0 %); б – зависимость тепловых мощностей в процессе нагрева металлолома конвертерным газом от доли лома в металлошихте: 1 – тепловая мощность, получаемая от сжигания конвертерного газа,  $Q_m^{кг}$  (верхняя линия для выхода газа при содержании углерода в чугуне 4,5 %, нижняя – 3,0 %), 2 – тепловая мощность, необходимая для нагрева металлолома,  $Q_m^H$  (верхняя линия для нагрева лома до 1000 °С, нижняя – до 600 °С)

Сравнение тепловых мощностей  $Q_m^H$  и  $Q_m^{кг}$  показывает, что энергетического потенциала конвертерного газа для нагрева лома, например, до 1000 °С, достаточно для массы лома, соответствующей его доле в металлошихте в пределах 34,2÷46,5 %, а при нагреве лома до 600 °С количество нагреваемого лома может составить свыше 50 % от массы металлошихты.

Масса нагреваемого лома в значительной степени зависит от количества выделяющегося газа, которое, как было отмечено выше, определяется содержанием углерода в чугуне. При увеличении содержания углерода в чугуне от 3,0 до 4,5 % и нагреве лома до 1000 °С его масса в массе металлошихты конвертерной плавки может возрасти на 9,2–11,7 % в зависимости от продолжительности продувки конвертера.

В целом же приведенные на рис. 1 результаты расчета указывают на достаточно высокий энергетический потенциал конвертерного газа и возможность нагрева теплотой газа массы лома, составляющей значительную долю от массы металлошихты конвертерной плавки даже с учетом снижения выхода газа вследствие сокращения расхода чугуна при использовании нагретого лома.

Температура и масса нагретого лома при подаче лома в конвертер должны быть согласованы с тепловым балансом конвертерной плавки.

Совместное решение уравнений тепловых балансов подогревателя лома и конвертерной плавки дает выражение для определения температуры лома при использовании физической  $Q_{\text{кгф}}$  и химической  $Q_{\text{кгх}}$  теплоты конвертерного газа с учетом охлаждающего эффекта лома  $q_{\text{л}}$  и избыточной теплоты конвертерного процесса  $Q_{\text{изб}}$ :

$$t_{\text{л}} = \frac{q_{\text{л}}}{C_{\text{л}}} \left[ 1 - \frac{Q_{\text{изб}}}{Q_{\text{изб}} + (Q_{\text{кгф}} + Q_{\text{кгх}}) \eta_{\text{н}}} \right], \quad (3)$$

где  $Q_{\text{кгф}}$ ,  $Q_{\text{кгх}}$  – физическая и химическая теплота конвертерного газа;  $q_{\text{л}}$  – охлаждающий эффект лома;  $Q_{\text{изб}}$  – избыточная теплота конвертерного процесса.

Увеличение доли лома в металлошихте за счет возврата теплоты газа в конвертер определяется выражением:

$$\Delta m_{\text{л}} = \left\{ q_{\text{л}} / [Q_{\text{изб}} + (Q_{\text{кгф}} + Q_{\text{кгх}}) \eta_{\text{н}}] + 0,01 \right\}^{-1} - [q_{\text{л}} / (Q_{\text{изб}} + 0,01)]^{-1}. \quad (4)$$

Избыточная теплота конвертерного процесса вычислялась по методике, приведенной в работе [3], при следующих исходных данных: температура заливаемого в конвертер чугуна – 1350 °С; состав чугуна – углерод 4 %, кремний 0,8 %, марганец 0,5 %; температура выпуска стали – 1600 °С; состав выплавляемой стали – углерод 0,25 %, кремний 0,25 %, марганец 0,30 %.

Расчеты по формулам (3) и (4) выполнены методом последовательных приближений с варьированием параметров нагрева в следующих интервалах: доля отводимого в подогреватель газа изменялась в пределах 0,2÷1, температура газа – 50÷1600 °С, тепловой КПД нагрева (степень использования теплоты газа) – 0,3÷0,5, степень дожигания газа в процессе нагрева лома – 0,6÷1.

Такое изменение параметров позволяет представить процесс нагрева металлолома в разнообразных вариантах его исполнения и при различной тепловой эффективности нагрева лома.

Неполное использование газа возможно при небольших мощностях располагаемого оборудования для нагрева металлолома, а также при ограниченных возможностях подачи газа на нагрев лома в случае одновременного его использования для других целей, например, в ОКГ для выработки пара.

Температура газа 50 °С соответствует использованию охлажденного газа после мокрой очистки, а более высокие температуры, вплоть до 1600 °С, – использованию высокотемпературного газа, отбираемого из газоотводящего тракта конвертера до газоочистки.

Неполное сжигание газа предусмотрено для создания в подогревателе частично восстановительной атмосферы с целью снижения угара металла в процессе нагрева металлолома.

Графики, приведенные на рис. 2 и 3, позволяют представить температуру нагрева лома и соответствующее увеличение доли лома в металлошихте кислородно-конвертерной плавки в совокупности всех вышеперечисленных вариантов нагрева лома.

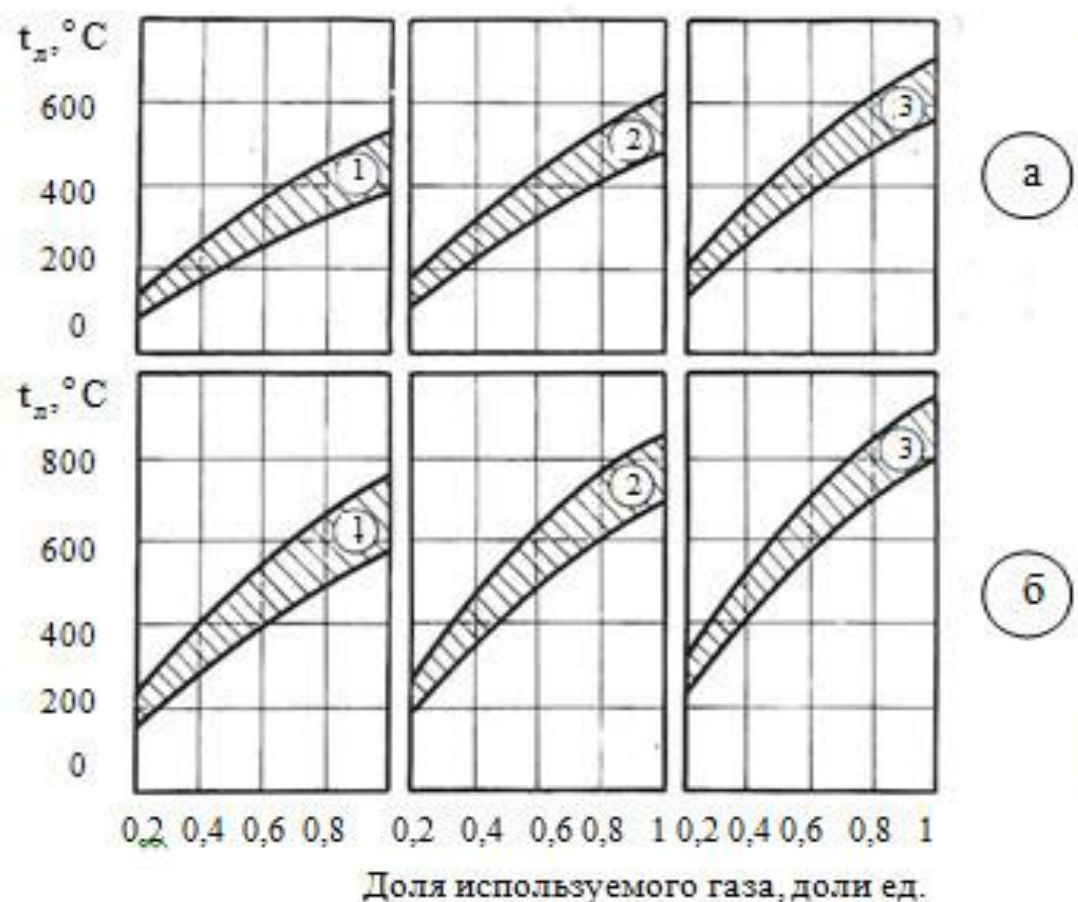


Рис. 2. Зависимость температуры нагрева лома ( $t_n$ ) от доли используемого газа (верхние линии при температуре отводимого на использование газа 1600 °С, нижние – 50 °С): а – при тепловом КПД нагрева (степени использования теплоты газа) 0,3; б – 0,5; 1 – при степени дожигания газа 0,6; 2 – 0,8; 3 – 1

В частности, при использовании газа в полном объеме (доля используемого газа 1) температура нагрева лома (см. рис. 2) может составить в зависимости от величины КПД нагрева, который представлен на графиках значениями 0,3 и 0,5, соответственно, 395÷715 °С и 590÷950 °С, где нижние температуры интервалов относятся к использованию охлажденного газа при степени его дожигания 0,6, а верхние – при использовании высокотемпературного газа (1600 °С) со степенью дожигания 1, т. е. приведенные интервалы температур охватывают весь расчетный диапазон вариантов нагрева лома по степени использования теплоты газа.

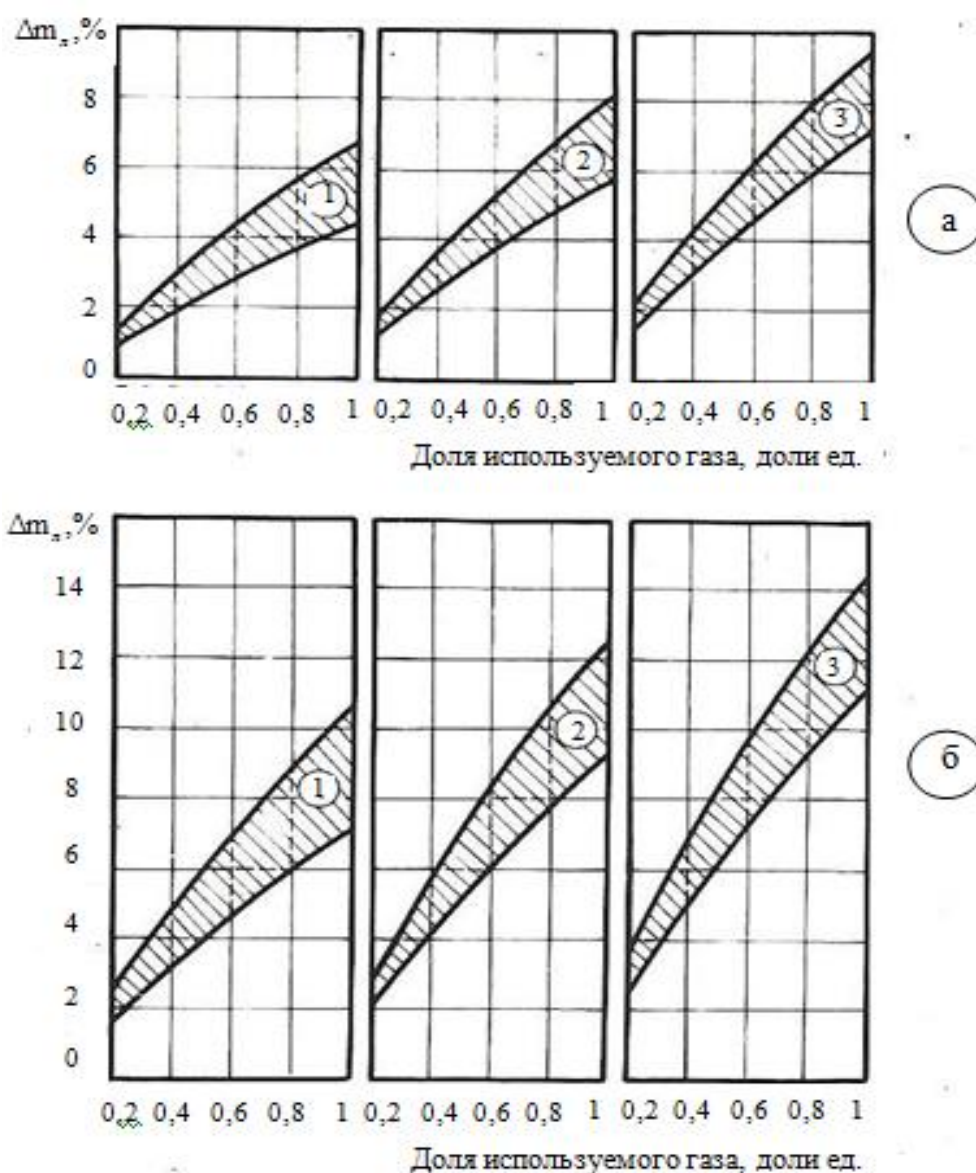


Рис. 3. Зависимость увеличения доли лома ( $\Delta m_{\text{л}}$ ) в металлошихте кислородно-конвертерной плавки от доли используемого газа (верхние линии при температуре отводимого на использование газа 1600 °С, нижние – 50 °С):  
 а – при тепловом КПД нагрева (степени использования теплоты газа) 0,3;  
 б – 0,5; 1 – при степени дожигания газа 0,6; 2 – 0,8; 3 – 1

Использование высокотемпературного газа (1600 °С) по сравнению с охлажденным увеличивает температуру нагрева лома на 150–200 °С, причем по мере снижения степени дожигания газа значение физической теплоты газа при нагреве лома возрастает.

При уменьшении доли используемого газа температура нагрева лома соответственно снижается. Например, при использовании 20 % выделяющегося из конвертера газа температура нагрева лома в зависимости от теплового КПД нагрева и степени дожигания газа составляет в пределах 100÷350 °С.

В соответствии с температурой нагрева лома изменяется и его доля в металлошихте (см. рис. 3).

При использовании конвертерного газа в полном объеме и при полном его дожигании

увеличение доли лома в металлошихте в зависимости от величин теплового КПД нагрева (0,3 и 0,5) может составить, соответственно,  $7,3 \div 9,5$  % и  $11,2 \div 14,2$  %, где нижние пределы относятся к использованию охлажденного газа, а верхние – высокотемпературного. При уменьшении количества используемого газа и снижении степени его дожигания возможное увеличение доли лома в металлошихте, соответственно, снижается.

В целом же из приведенных результатов расчета следует, что нагрев металлолома конвертерным газом позволяет увеличить долю лома в металлошихте, которая без подогрева составляет максимум  $25 \div 30$  %, на  $7,3 \div 18,5$  % и обеспечить этим расход лома в конвертерной плавке до  $32,3 \div 48,5$  % от массы металлошихты.

### Список использованных источников

1. Гичев Ю. А. Взгляд на проблему использования отходящих газов сталеплавильных конвертеров // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2004. – №2(8). – С. 30–36.
2. Бережинский А. И., Циммерман А. Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1983. – 272 с.: ил.
3. Баптизманский В. И., Бойченко Б. М., Третьяков Е. В. Металлолом в шихте кислородных конвертеров. – М.: Металлургия, 1982. – 136 с.: ил.

УДК 669.051

**В. Г. Голубев, А. С. Колесников**

РГП на ПХВ «Южно-Казахстанский государственный университет имени М. Ауэзова», г. Шымкент, Республика Казахстан

## РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ И МЕТОДИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

### Аннотация

*На настоящий момент практически отсутствуют исследования процесса гидродинамики течения вязкой суспензии по наружной поверхности вертикальной трубы, однако на практике этот процесс получил естественное распространение. Основанием для разработки послужила необходимость создания конденсаторов поверхностного типа, отвечающих следующим основным требованиям: высокая эффективность устойчивой работы в запыленных парогазовых смесях при низком гидравлическом сопротивлении; обеспечение масштабного перехода; низкая металлоемкость и компактность; возможность самоочистки теплообменной поверхности. Исходными данными для разработки стали результаты анализа работы кожухотрубных конденсаторов, используемых в металлургической и энергетической отраслях Республики Казахстан, основные требования к созданию перспективных*